

## Inhaltsübersicht

- Potential der Kernenergie
- Aktuelle Situation
- Wassermoderierte Reaktoren
- Weltweiter Betrieb und Bau von Kernkraftwerken
- Kernbrennstoffversorgung
- Brennstoffkreislauf und Entsorgung
- ~~Entsorgung~~
- Zusammenfassung 1
- Das Generation IV International Forum (GIF)
- Ausgewählte Gen IV – Konzepte
- Empfehlungen zur Kernenergie in Deutschland
- DFR

## Potential der Kernenergie

Kernenergie kann die Versorgung der Menschheit mit Energie über Jahrtausende leisten.

Dafür ist ein Brennstoffkreislauf notwendig, bestehend aus:

- Reaktoren mit langsamen Neutronen als sichere und kostengünstige „Arbeitstiere“,
- Brutreaktoren mit schnellen Neutronen zur optimalen Nutzung des Natururan,
- Wiederaufarbeitungsanlagen zur Trennung von Brennstoff und Müll,
- Endlager zur sicheren Verbringung des Mülls.

## Aktuelle Situation

Kernenergie steht in Konkurrenz zu fossiler Energie, die günstig und reichlich vorhanden ist.

Auch Kernbrennstoff ist günstig und reichlich vorhanden.

Die Brennstoffkosten machen nur ca. 10% der Gesteungskosten für Strom aus Kernenergie aus.

Brutreaktoren werden derzeit nicht benötigt. Sie sind langfristig zur optimalen Nutzung des Brennstoffs notwendig.

Wiederaufarbeitung wurde in Deutschland verboten.

Endlagerung ist kein geologisches oder technisches Problem, sondern in Deutschland ein politisches.

## Wassermoderierter Reaktoren

**Wassermoderierte Reaktoren** sind die wirtschaftlichsten Kernkraftwerke.

Sie haben ein sicheres und sehr gut regelbares Betriebsverhalten.

Die Auslegungstemperaturen sind kleiner  $400\text{ °C}$  und erlauben die Verwendung bekannter Stähle mit langer Lebensdauer.

Der Brennstoff wird durch Wasser abgeschirmt und haftet nicht an den Wandungen des Primärkreises.

Das bedeutet geringe Strahlenbelastung und erlaubt problemlose Prüfungen oder Reparaturen.

## Sicherheit Wassermoderierter Reaktoren

Gen IV Forum ( Basis for the Safety Approach for Design & Assessment of Generation IV Nuclear Systems) schreibt zu den wassermodierten Gen. III+ Reaktoren:

„Durch das Auslegungskriterium des EPR, wonach ein Kernschmelzunfall nur sehr begrenzte Auswirkungen auf die Umgebung der Anlage haben darf, ist der Unterschied zur Generation IV ebenfalls vernachlässigbar. So kommt die Risk and Safety Working Group (RSWG) des Generation IV International Forums zu dem Schluss, dass der Sicherheitsstandard des EPR und AP1000 „exzellent“ sei und als Referenz für zukünftige Reaktoren genommen werden sollte.“

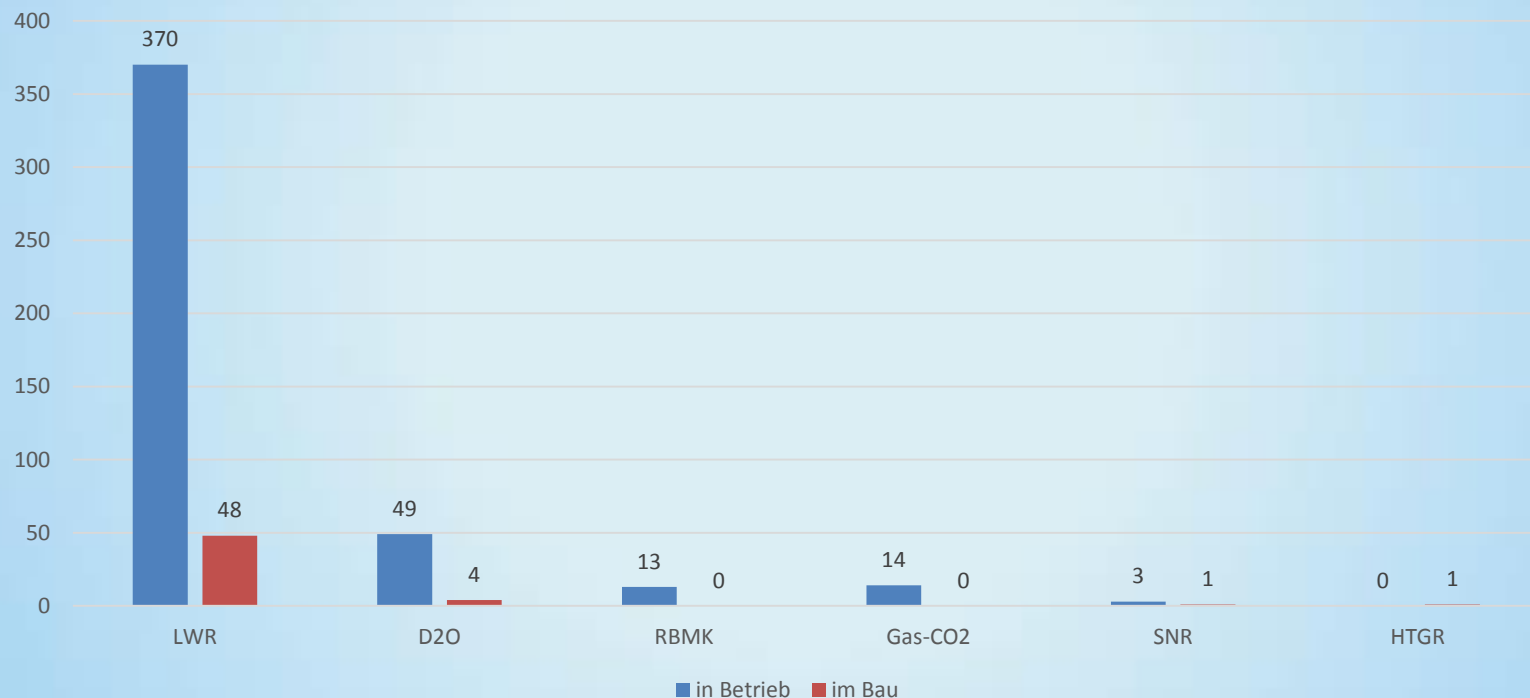
**GEN IV orientiert sich bei Sicherheit an den bestehenden KKW! (Bereits Gen III Reaktoren sind ähnlich sicher)**

## Weltweiter Betrieb und Bau von Kernkraftwerken

Ende 2019 waren in 31 Ländern 449 Kernkraftwerke mit 425 GWe in Betrieb und in 18 Ländern 54 mit 58 GWe im Bau.

Daten aus der Zeitschrift atw Vol 65 (2020) / Issue 1 / Januar, Statistics 48

Reaktoren in Betrieb und im Bau



94% der in Betrieb und im Bau befindlichen Reaktoren sind wassermoderierte Reaktoren.

## Weltweiter Betrieb und Bau von Kernkraftwerken

Ende 2019 waren in 31 Ländern 449 Kernkraftwerke mit 425 GWe in Betrieb und in 18 Ländern 54 mit 58 GWe im Bau.

Daten aus der Zeitschrift atw Vol 65 (2020) / Issue 1 / Januar, Statistics 48

Die 2 im Bau befindlichen, nicht wassermoderierten Reaktoren sind:

- Der chinesische heliumgekühlte und graphitmoderierte Hochtemperaturreaktor HTGR (200 MWe) in Shidaowan.
- Der indische natriumgekühlte Brüter SNR-500 in Kalkapam. An diesem Standort entsteht eine komplette Infrastruktur für Wiederaufarbeitung, Brennelementfertigung und Abfallkonditionierung.

## Kernbrennstoffversorgung

Für jeden Betrieb eines Kernreaktors ist immer mindestens eines der 3 Nuklide  $^{235}\text{U}$ ,  $^{239}\text{Pu}$  oder  $^{233}\text{U}$  in entsprechender Konzentration als Kernbrennstoff zur Erreichung und Aufrechterhaltung der Kettenreaktion notwendig.

Natururan besteht zu 99,3 % aus  $^{238}\text{U}$  ( $T_{1/2} \approx 4,5 * 10^9 \text{ a}$ ) und zu 0,7 % aus  $^{235}\text{U}$  ( $T_{1/2} \approx 0,7 * 10^9 \text{ a}$ ).

$^{239}\text{Pu}$  ( $T_{1/2} \approx 24 * 10^3 \text{ a}$ ) kommt in der Natur nicht vor kann aber durch Neutronenbeschuss aus  $^{238}\text{U}$  erzeugt werden und entsteht in jedem Reaktor.

$^{233}\text{U}$  ( $T_{1/2} \approx 160 * 10^3 \text{ a}$ ) kommt in der Natur nicht vor kann aber durch Neutronenbeschuss aus  $^{232}\text{Th}$  erzeugt werden.

Thorium besteht zu 100 % aus  $^{232}\text{Th}$  ( $T_{1/2} \approx 14 * 10^9 \text{ a}$ ).



## Kernbrennstoffversorgung

In den 70-er Jahren wurde der Uranbedarf stark überschätzt. Dies hatte Überproduktion, Preisverfall, Schließung von Uranminen und Einstellung der Exploration nach Uran und Thorium zur Folge.

In den neunziger Jahren begann dann die nukleare Abrüstung der Großmächte, so dass bis heute Brennelemente für Kernkraftwerke durch Vermischung von hochangereichertem spaltbarem Material aus Kernwaffen mit abgereichertem Uran hergestellt werden (Enriched-Reprocessed-Uranium-Brennelemente (ERI-BE)).

## Kernbrennstoffversorgung

Für die nächsten Jahrzehnte ist kein Engpass in der Uranversorgung auf dem heutigen Kostenniveau zu erwarten.

Uran wird meist zusammen mit anderen Metallen wie Nickel, Gold, Kobalt, Wismut, Silber, Niob, Kupfer gefördert.

Es wird z. B. abgebaut in Kasachstan, Kanada, Australien, Russland, Marokko, Kongo, Namibia, USA, China, Schweden, Ukraine, Guyana, Chile, Mongolei.

Neben Uran kann Thorium ( $^{232}\text{Th}$ ) zusammen mit  $^{235}\text{U}$  oder  $^{239}\text{Pu}$  als Kernbrennstoff genutzt werden.

# Kernbrennstoffversorgung



Von Geomartin – Eigenes Werk, CC BY-SA-3.0, <https://commons.wikipedia.org/w/index.php?curid=6592023>

## Tagebau - Uranmine Ranger 3 im Northern Territory, Australien

## Brennstoffkreislauf und Entsorgung

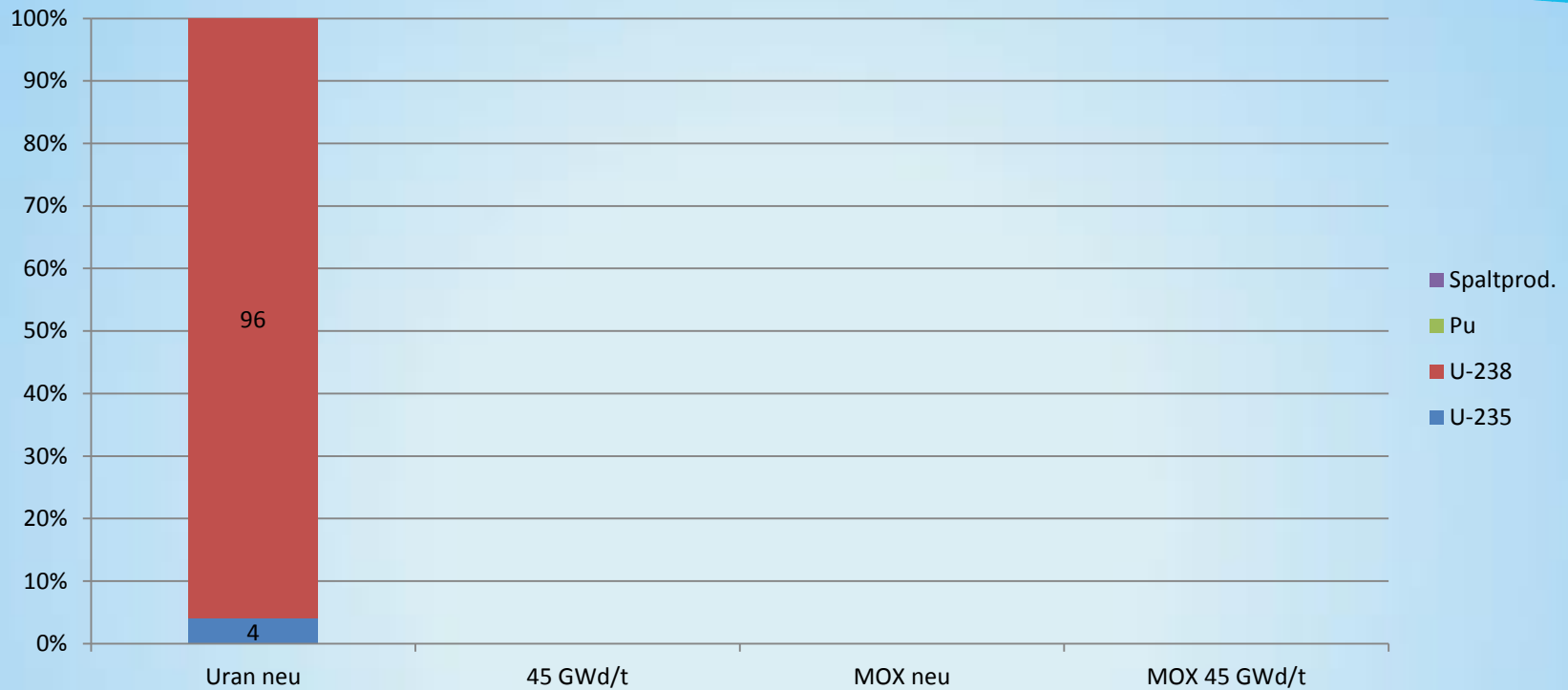
Die Brennstoffversorgung und Entsorgung und die dazu notwendigen Quantitäten am Beispiel eines 1400 MWe DWR

Ein 1400 MWe - DWR benötigt für ca. 1 Jahr Betrieb (11 TWh) ca. 20 t Kernbrennstoff, zu deren Herstellung ca. 180 t Natururan benötigt werden.

Mit Wiederaufbereitung der abgebrannten Kernbrennstäbe zur Nutzung des darin enthaltenen  $^{239}\text{Pu}$  verringert sich der Natururanbedarf auf ca. 120 t/a.

Ein Brennelement bleibt ca. 5 Jahre im Reaktor und hat dann ca. folgende Zusammensetzung:

## Brennstoffkreislauf und Entsorgung



Ein typisches BE eines 1400 MWe - DWR

**Spaltpr.**

**Pu**

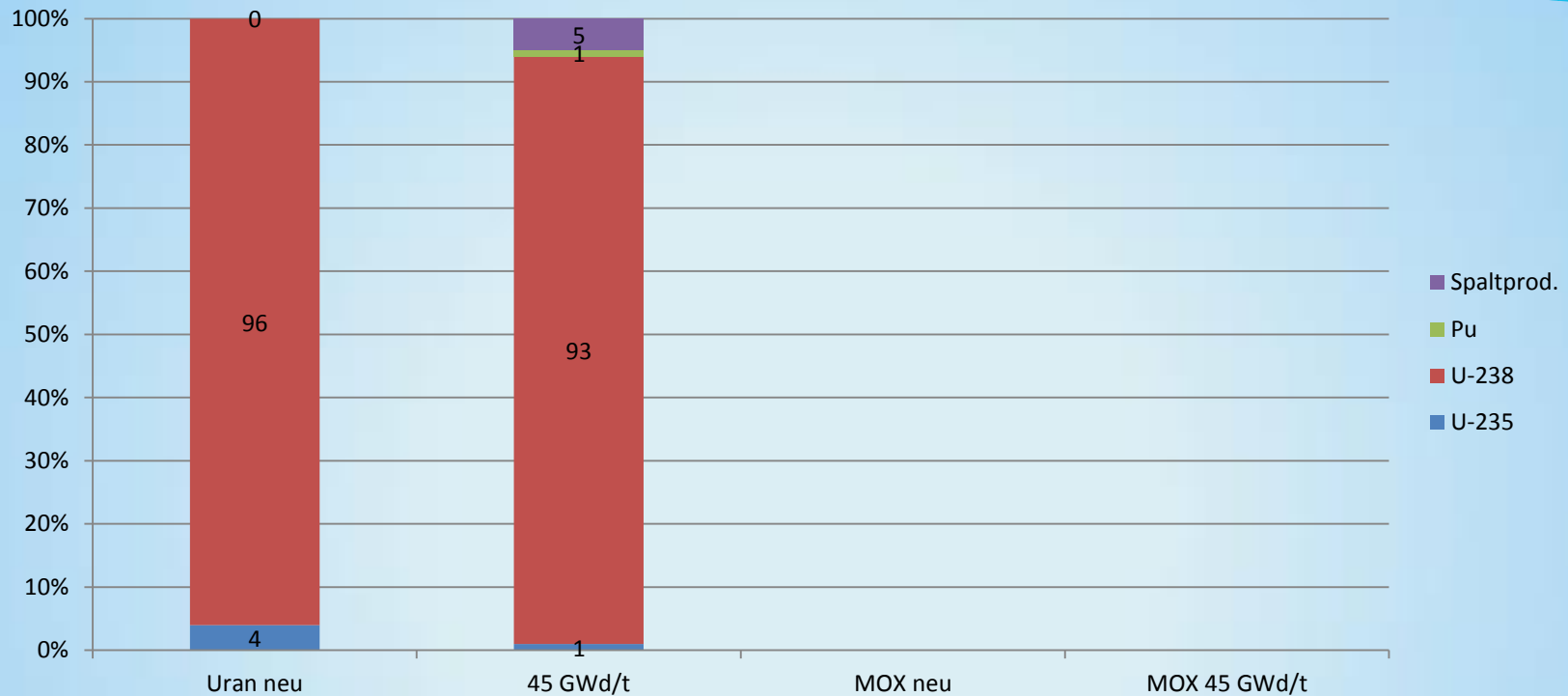
**U-238**      **480,0kg=96,0%**

**U-235**      **20,0kg= 4,0%**

**Minore**

**Actinoide**

## Brennstoffkreislauf und Entsorgung



*Ein typisches BE eines 1400 MWe - DWR*

**Spaltpr.** 24,5kg= 4,9%

**Pu** 5,0kg= 1,0%

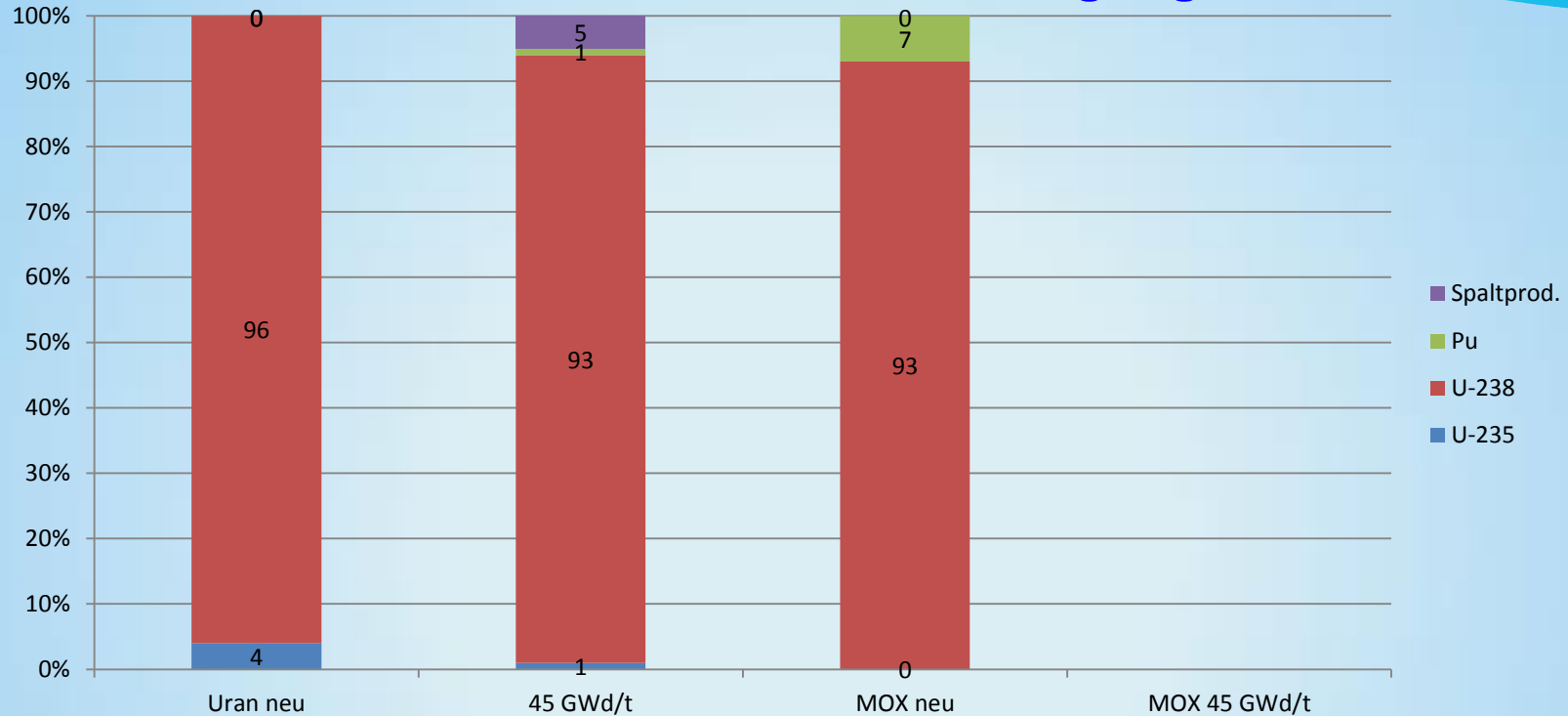
**U-238** 480,0kg=96,0% **465,0kg=93,0%**

**U-235** 20,0kg= 4,0% **5,0kg= 1,0%**

**Minore** 0,5kg= 0,1%

**Actinoide**

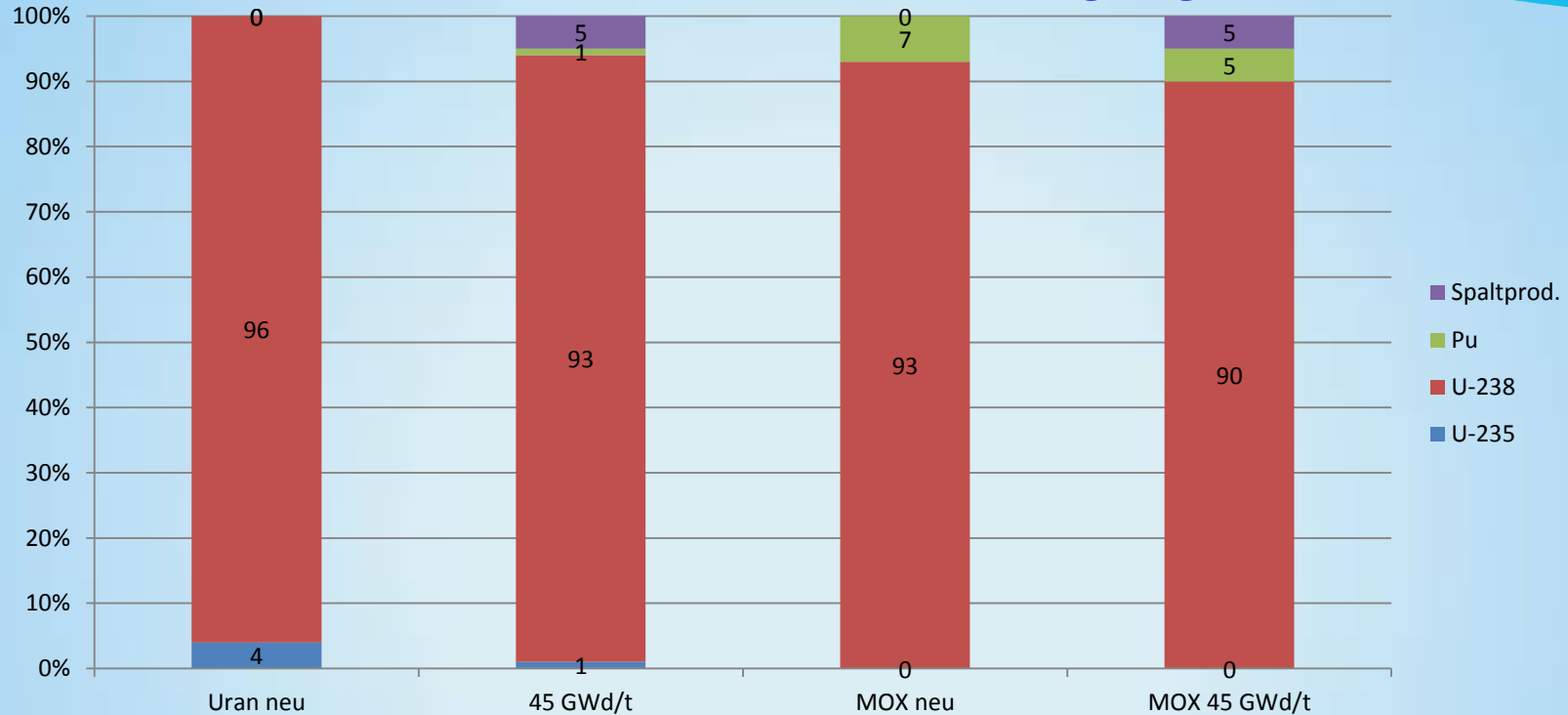
## Brennstoffkreislauf und Entsorgung



*Ein typisches BE eines 1400 MWe - DWR*

<b>Spaltpr.</b>		24,5kg= 4,9%	
<b>Pu</b>		5,0kg= 1,0%	<b>35,0kg= 7,0%</b>
<b>U-238</b>	480,0kg=96,0%	465,0kg=93,0%	<b>464,0kg=92,8%</b>
<b>U-235</b>	20,0kg= 4,0%	5,0kg= 1,0%	<b>1,0kg= 0,2%</b>
<b>Minore</b>		0,5kg= 0,1%	
<b>Actinoide</b>			

## Brennstoffkreislauf und Entsorgung



*Ein typisches BE eines 1400 MWe - DWR*

<b>Spaltpr.</b>		24,5kg= 4,9%		<b>24,5kg= 4,9%</b>
<b>Pu</b>		5,0kg= 1,0%	35,0kg= 7,0%	<b>25,0kg= 5,0%</b>
<b>U-238</b>	480,0kg=96,0%	465,0kg=93,0%	464,0kg=92,8%	<b>450,0kg=90,0%</b>
<b>U-235</b>	20,0kg= 4,0%	5,0kg= 1,0%	1,0kg= 0,2%	
<b>Minore</b>		0,5kg= 0,1%		<b>0,5kg= 0,1%</b>
<b>Actinoide</b>				



## Brennstoffkreislauf und Entsorgung

Außer Uran entstehen die oben genannten Stoffe in jedem Reaktor.

Plutonium ist dabei ein wertvoller Kernbrennstoff und kann in fast jedem Reaktor genutzt werden.

Mit Plutonium im Endlager steigen die zeitlichen Anforderung an die Endlagerzeit von einigen tausend auf einige hunderttausend Jahre.

Minore Actinoide sind sehr kleine Mengen, die entweder endgelagert oder transmutiert werden müssen.

$^{238}\text{U}$  mit  $T_{1/2} \approx 4,5 \cdot 10^9$  a ist nur schwach radioaktiv und kommt auch in der Natur ohne Endlager vor. Es ist aber ein potentieller Kernbrennstoff in „Schnellen Brüttern“.

## Zusammenfassung 1

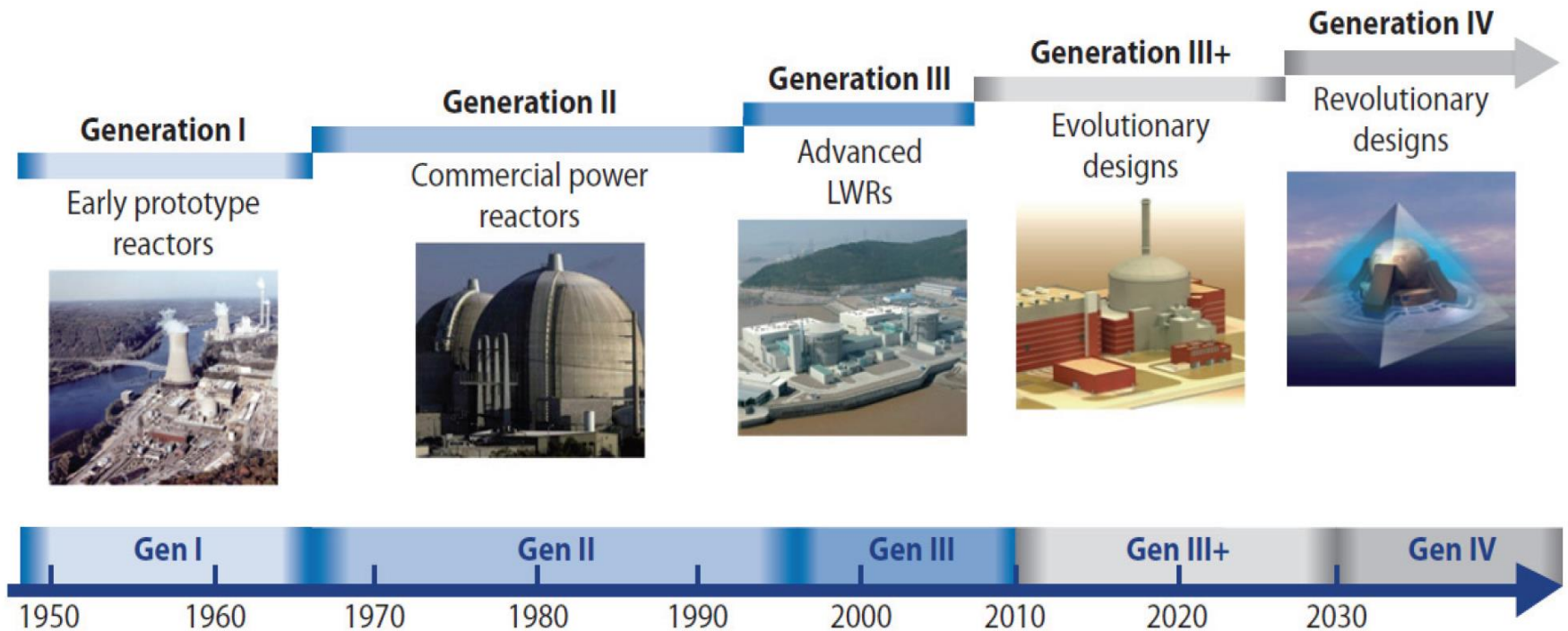
Kurzfristig ist Kernbrennstoff ausreichend und günstig vorhanden, für dessen Nutzung wassermoderierte Reaktoren optimal sind.

Für die langfristige (mehrere 1000 Jahre) Kernenergienutzung ist ein Brennstoffkreislauf notwendig mit:

- Brütern zur Nutzung der großen Anteile  $^{238}\text{U}$  im Natururan (und wenn für nötig erachtet die Transmutation minorer Actinoide),
- Wiederaufbereitungsanlagen zur Trennung von Kernbrennstoff und Müll,
- wassermoderierte Reaktoren zur kostengünstigen Nutzung des Kernbrennstoffs,
- Endlager für den Atommüll (ohne Ewigkeitsproblematik).

# Gen IV Konzepte

**Figure ES.1: Generations of nuclear power: Time ranges correspond to the design and the first deployments of different generations of reactors**



## Ausgewählte Gen IV - Konzepte

1. Gasgekühlter Schneller Reaktor (GFR)
2. Hochtemperaturreaktor (VHTR)
3. Superkritischer wassergekühlter Reaktor (SCWR)
4. Natriumgekühlter Schneller Reaktor (SNR)
5. Bleigekühlter Schneller Reaktor (LFR)
6. Schneller Salzschnmelze Reaktor (MSFR)
7. Hochtemperatur Salzschnmelze Reaktor (AHTR)

Die Konzepte 2, 3 und 7 nutzen thermische Neutronen

Die Konzepte 1 und 4 bis 6 nutzen schnelle Neutronen

## Ausgewählte Gen IV – Konzepte (thermisch)

### Hochtemperaturreaktor (VHTR)

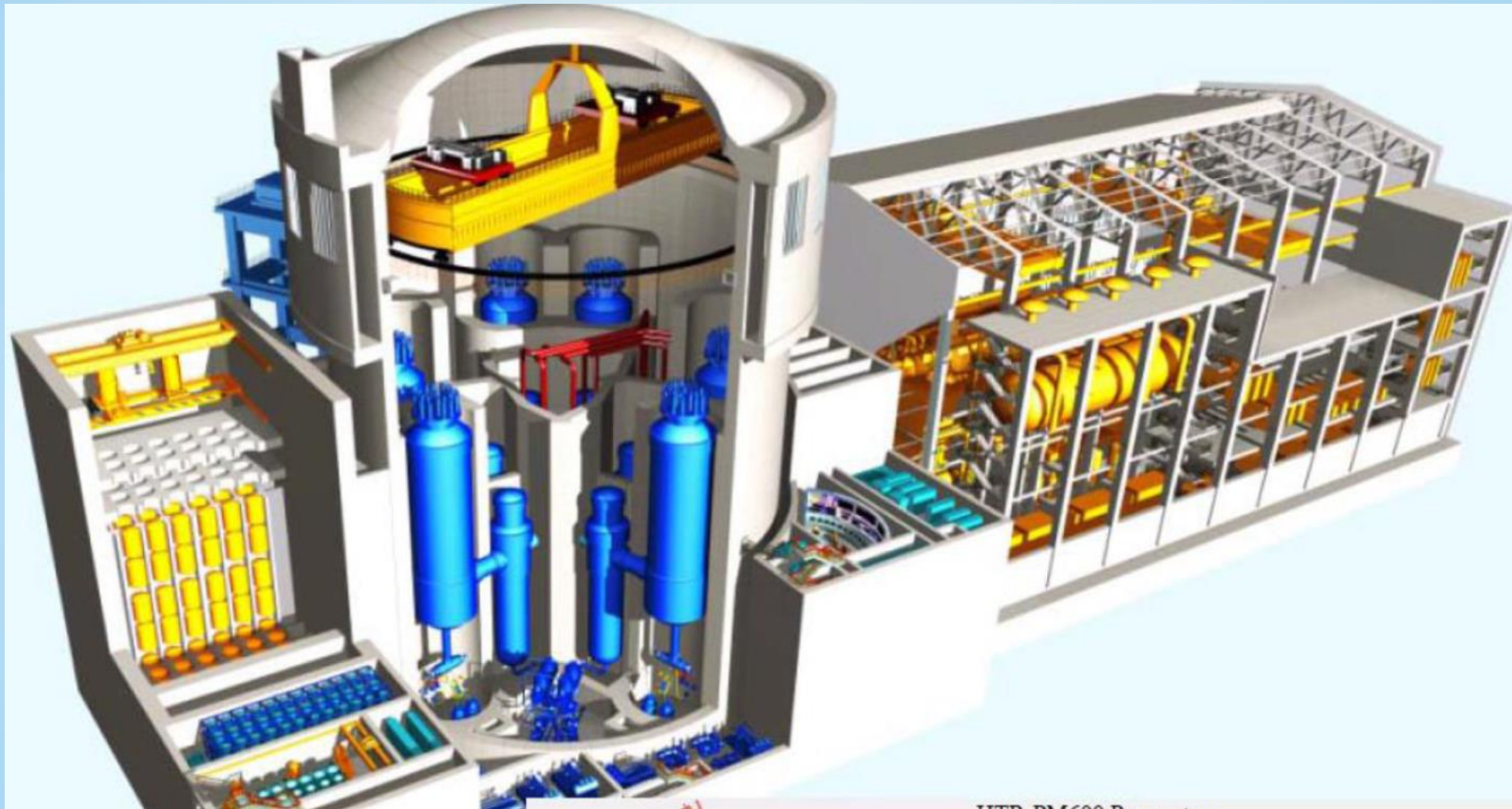
In Deutschland wurde der Thorium-Hochtemperatur-Reaktor (THTR-300) in Hamm-Uentrop errichtet, der ähnliche Eigenschaften hatte wie der VHTR haben soll, obwohl es das Gen IV Forum damals noch nicht gab.

Wenn kein Luft- oder Wassereintrag unterstellt wird, wäre er inhärent sicher. Er nutzte Thorium zusammen mit U-235 als Kernbrennstoff und sollte nach dem Fischer-Tropsch-Verfahren zur Kohleveredelung verwendet werden.

Er sollte eine heliumbetriebene Gasturbine antreiben, deren Entwicklung wegen technischer Schwierigkeiten eingestellt wurde. Wegen diverser technischer Schwierigkeiten aufgrund der hohen Temperaturen, defekter Brennstoffkugeln und da ein wirtschaftlicher Betrieb nicht erkennbar war, wurde diese Reaktor-Entwicklung eingestellt.

# Ausgewählte Gen IV – Konzepte (thermisch)

## Hochtemperaturreaktor (VHTR)



Kleinerer Typ für 200 MWe ist in Shidaowan (China) im Bau

## Ausgewählte Gen IV – Konzepte (thermisch)

### Superkritischer wassergekühlter Reaktor (SCWR)

Dieser Reaktor soll mit viel Neuentwicklung einen Wirkungsgrad von 44 % erreichen.

D.h. bezogen auf obiges Beispiel würde er statt mit 20 t/a Brennstoff mit 16 t/a auskommen.

Dies würde aber mit höheren Betriebstemperaturen und höheren Betriebsdrücken erkaufen.

Damit wären enorme technische Entwicklungen und Einschränkungen der Sicherheit verbunden

# Ausgewählte Gen IV – Konzepte (thermisch)

## Hochtemperatur Salzschnmelze Reaktor (AHTR)

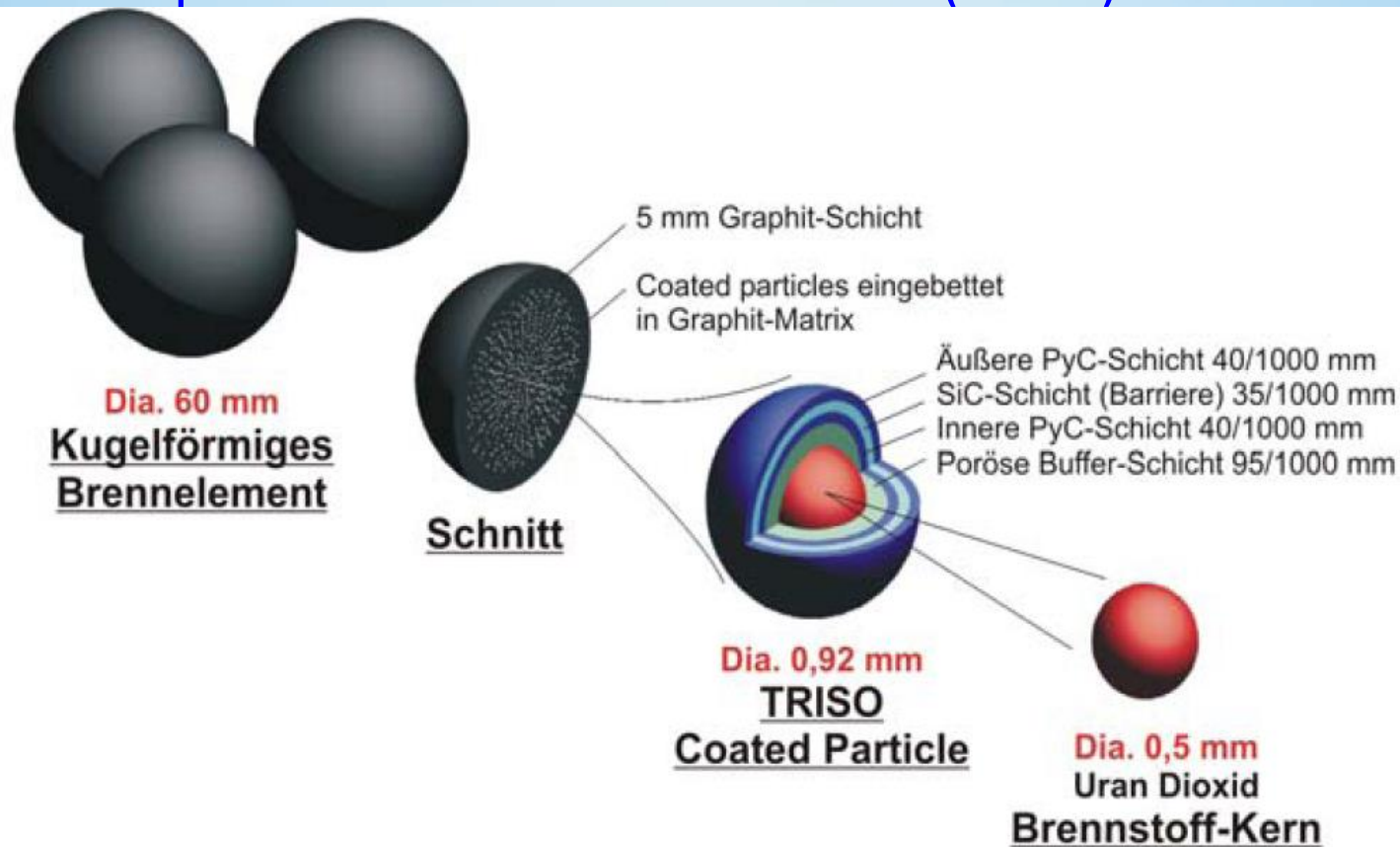


Abb. 4: Kugelförmige Brennelemente des PBMR Hochtemperaturreaktors

Kugelförmige Brennelemente ähnlich VHTR



## Ausgewählte Gen IV – Konzepte (schnell)

### Natriumgekühlter Schneller Reaktor (SNR)

Gemäß o. a. Statistik sind derzeit 3 SNR in Betrieb und einer im Bau.

In Deutschland wurde ein SNR-300 in Kalkar nach dem Loop-Konzept errichtet. Als er vollständig fertig war, wurde politisch entschieden, ihn nicht in Betrieb gehen zu lassen.

Er wird heute als Freizeitpark genutzt.

„Schnelle Brüter“ erzeugen mehr Kernbrennstoff  $^{239}\text{Pu}$  aus  $^{238}\text{U}$  als sie für ihren Betrieb benötigen.

Damit verlängern sie die Uranvorräte um den technisch nutzbaren Faktor 60 (aus 200 Jahre würden 12.000 Jahre).

Natriumtechnik ist aufwendig und teuer.

## Ausgewählte Gen IV – Konzepte (schnell)

### Natriumgekühlter Schneller Reaktor (SNR)

Kühlmittel ist flüssiges Natrium

Druck ist nahe Atmosphärendruck

Kühlmitteltemperatur 500 bis 550 °C

Der SNR ist bisher der einzige realisierte Reaktortyp der brüten kann.

Er wurde nach dem Loop und dem Pool –Konzept gebaut.

Korrosion ist kein Problem

**Natrium ist sehr reaktiv, Handhabung als Kühlmittel ist schwierig**

## Ausgewählte Gen IV – Konzepte (schnell)

### Natriumgekühlter Schneller Reaktor (SNR)

Kühlmittel ist

Druck ist nah

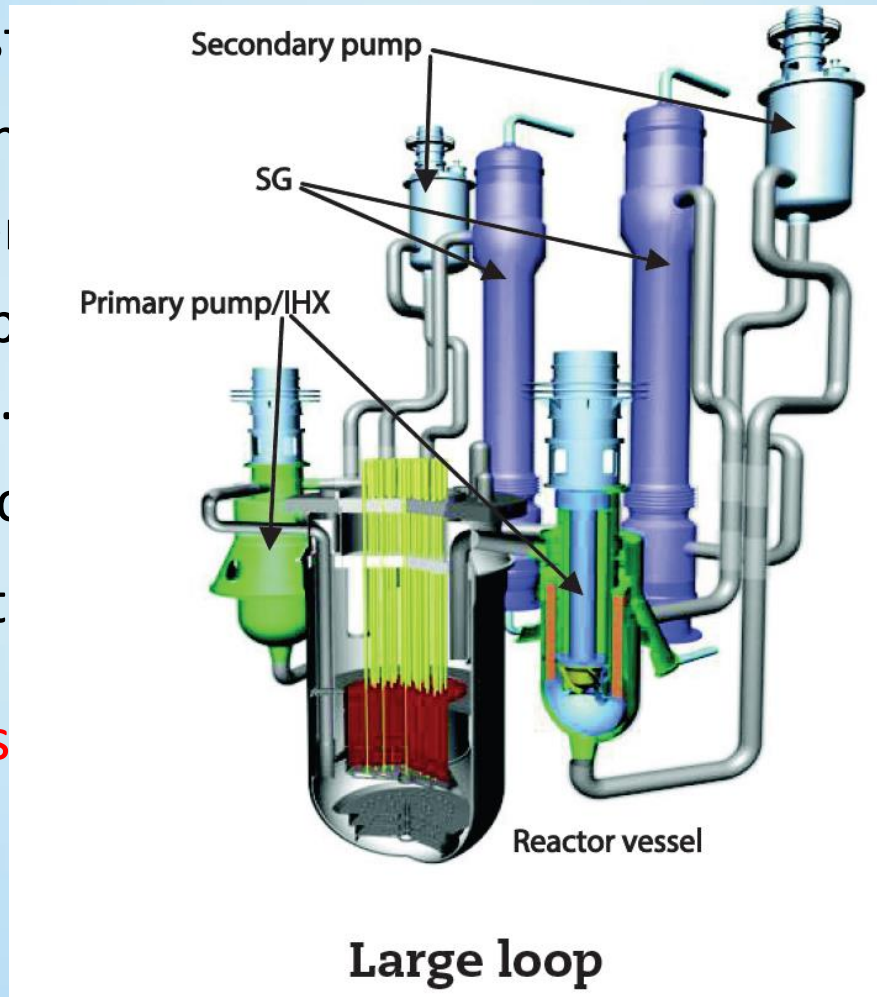
Kühlmitteltem

Der SNR ist b  
brüten kann.

Er wurde nac

Korrosion ist

Natrium ist s  
schwierig



ortyp der

ept gebaut.

mittel ist

## Ausgewählte Gen IV – Konzepte (schnell)

### Natriumgekühlter Schneller Reaktor (SNR)

Die Russen haben langjährige Erfahrungen mit den BN-600 und dem weiterentwickelten BN-800.

Sie haben die Kühlmittelhandhabung offensichtlich gut gelöst.

Der BN-800 soll eine Konversionsrate  $> 1,3$  erreichen.

Er soll minore Actinoide transmutieren können.

## Ausgewählte Gen IV – Konzepte (schnell)

### Natriumgekühlter Schneller Reaktor (SNR)

Die Russen haben  
und dem weiß

Sie haben die

Der BN-800 soll

Er soll minor

den BN-600

sch gut gelöst.

hen.



## Ausgewählte Gen IV – Konzepte (schnell)

### Bleigekühlter Schneller Reaktor (LFR)

Der bleigekühlte schnelle Brüter hat eine ähnliche Konzeption wie der natriumgekühlte schnelle Brüter.

Blei ist nicht so reaktiv wie Natrium und soll leichter handhabbar sein.

- **Korrosionsprobleme**

Bisher ist nicht bekannt, ob damit das Brüten gelungen ist.

# Ausgewählte Gen IV – Konzepte (schnell)

## Schneller gasgekühlter Reaktor (GFR)

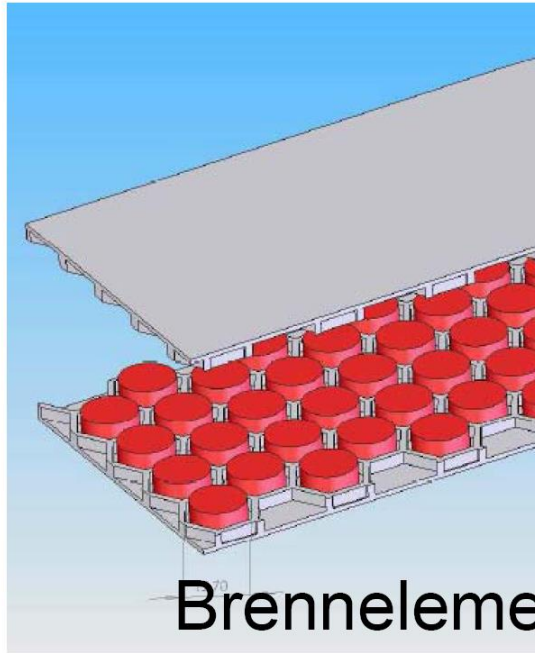
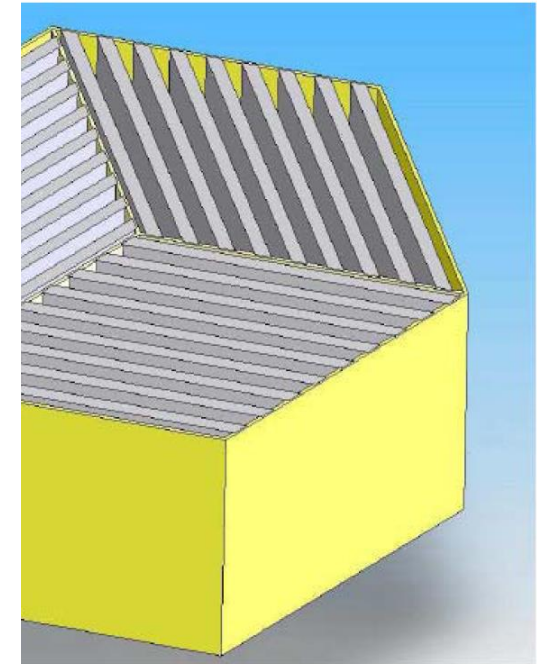
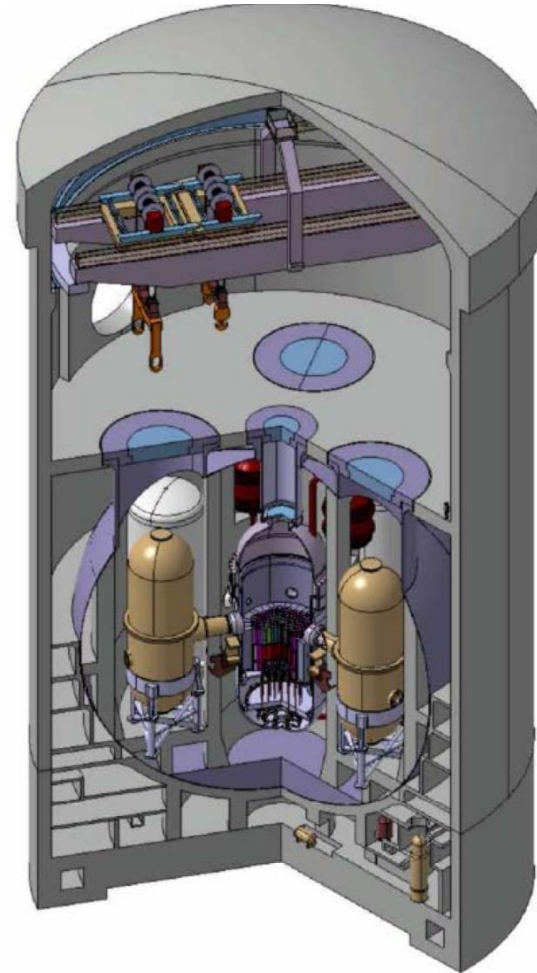


Abb. 6: Brennelement des schnellen



Garnier et al. (2006)

## Ausgewählte Gen IV – Konzepte (schnell)

### Schneller Salzschnmelze Reaktor (MSFR)

Hat eine umlaufende geschmolzene Fluoridsalz-Brennstoff-Mischung,

niedrigen Primärkreisdruck,

Temperatur 700 bis 800 °C.

Ziel ist auch die Transmutation minorer Actinoide.

Große Korrosionsprobleme, erheblicher Forschungsbedarf,  
Strahlenschutzfragen ungeklärt, Wiederaufarbeitung im  
Kraftwerk



# Ausgewählte Gen IV – Konzepte (schnell)

## Schneller Salzschnmelze Reaktor (MSFR)

Figure 2-3: Conceptual MOSART design (left) and MSFR (right)

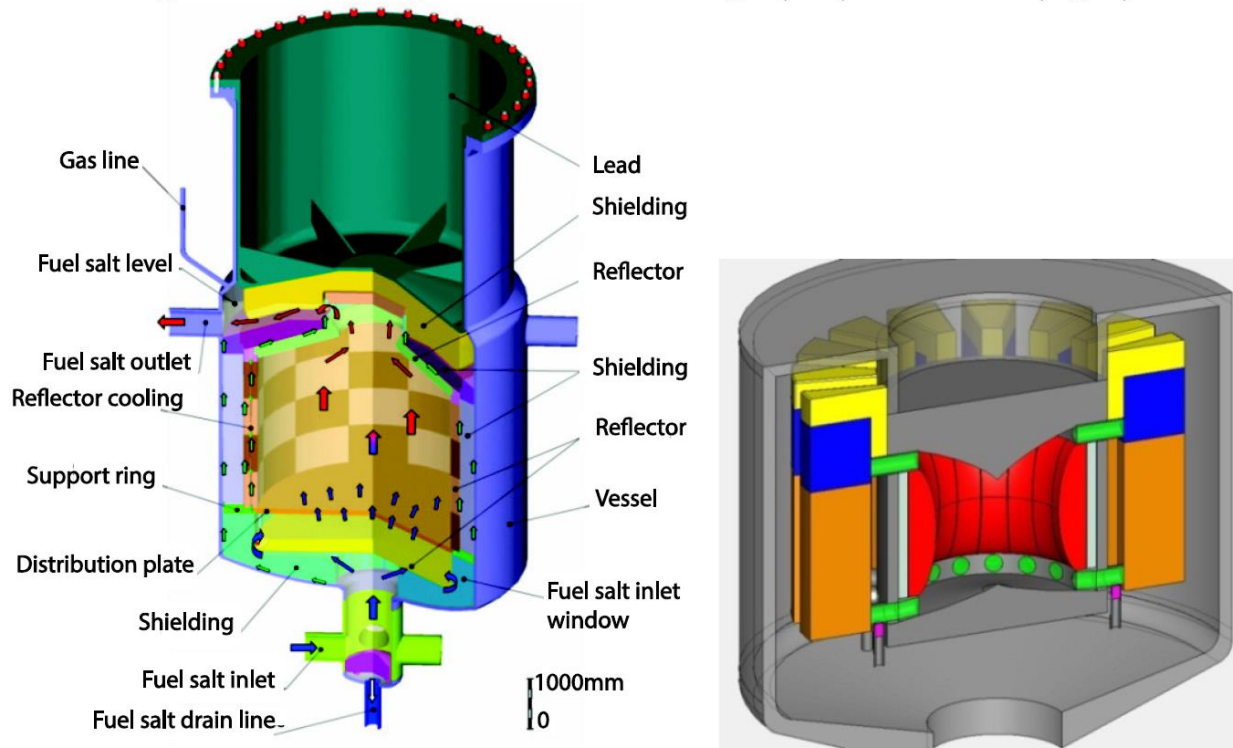


Figure 2-3 shows the conceptual designs of two MSR systems that are under consideration, the molten salt actinide recycler and transmutter (MOSART) and the molten salt fast reactor (MSFR).

## Voraussetzungen zur Wiedereinführung von Kernenergie in Deutschland

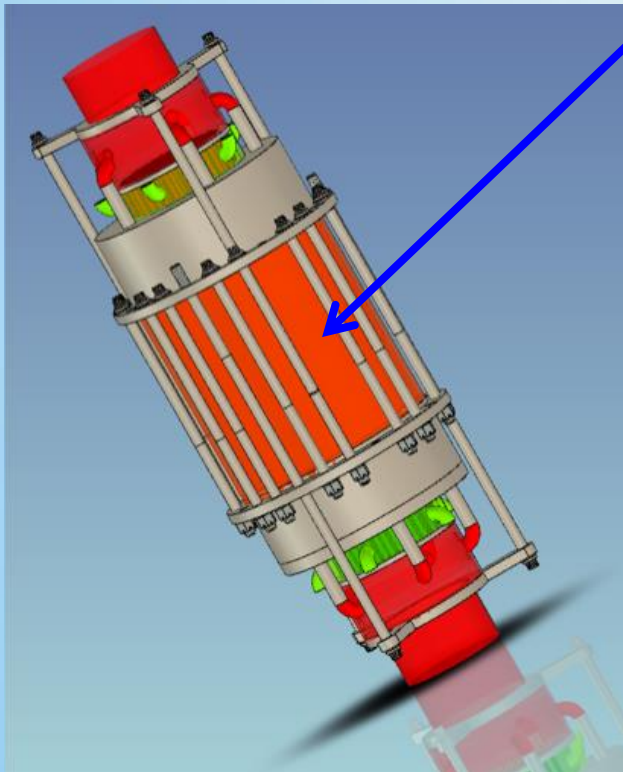
- Das Atomgesetz müsste wieder die Förderung der friedlichen Nutzung der Kernenergie zum Ziel haben.
- Deutschland bräuchte wieder ein leistungsfähiges Kernforschungszentrum.  
Die ehemaligen Kernforschungszentren Karlsruhe, Jülich und Geesthacht forschen praktisch nicht mehr in der Kerntechnik.
- Von dort sollte dann Beratung der Politik kommen
- Bei den Errichtern, Zulieferern und Betreibern von Kernkraftwerken müsste nach Jahren der ausstiegsorientierten Atomaufsicht wieder Vertrauen in eine langfristig stabile Energiepolitik mit Kernkraftwerken aufgebaut werden.

## Empfehlungen zur Wiedereinführung von Kernenergie in Deutschland

- Aus technologischer und wirtschaftlicher Sicht wären die LWR der Generation III oder III+ derzeit optimal.  
[EPR (Frankreich), AP1000 (USA), WWER-1200 (Russland), ABWR (Japan), APR1400 (Korea)].
- Wiederaufarbeitung könnte zunächst im Ausland und dann auch in Deutschland erfolgen.
- Endlager sollten in Betrieb genommen werden.
- Ein "Brüter" könnte ohne Zeitdruck entwickelt werden (eventuell in Zusammenarbeit mit den Russen und ihrem BN-800).

## Dual Fluid Reaktor (DFR)

U- und Pu-Salze oder U/Pu Legierungen werden von Blei gekühlt (1000 °C)



- **Keramik-Behälter**
- Keine Regelwerke, keine Normen, keine Kennwerte zur Berechnung
- Keine Erfahrungen (Es gibt keine)
- **Keine Chance auf Zulassung** nach
  - Druckgeräterichtlinie (Konventionell), <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=CELEX:32014L0068&from=DE>
  - KTA-Regelwerk (Kerntechnik)
  - ([http://www.kta-gs.de/common/regel\\_prog1.htm](http://www.kta-gs.de/common/regel_prog1.htm))

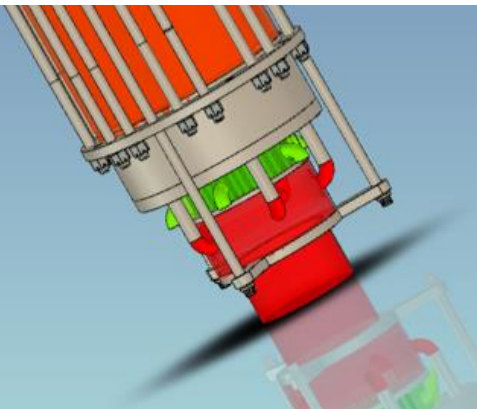
## Dual Fluid Reaktor (DFR)

U- und Pu-Salze oder U/Pu Legierungen werden von Blei gekühlt (1000 °C)

### ➤ **Keramik-Behälter**

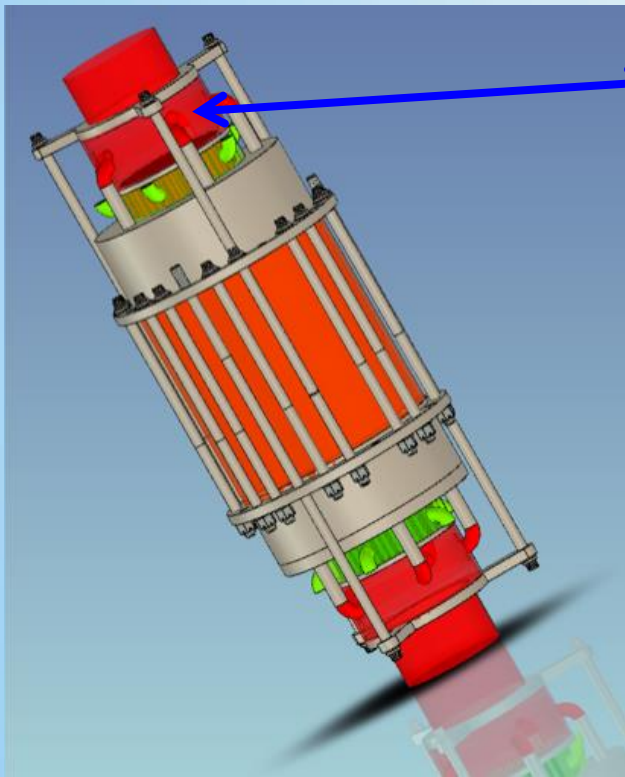
#### 7.5. Werkstoffeigenschaften

Sofern nicht andere zu berücksichtigende Kriterien andere Werte erfordern, gilt ein Stahl als ausreichend duktil im Sinne von Nummer 4.1 Buchstabe a, wenn seine Bruchdehnung im normgemäß durchgeführten Zugversuch mindestens 14 % und die Kerbschlagarbeit an einer ISO-V-Probe bei einer Temperatur von höchstens 20 °C, jedoch höchstens bei der vorgesehenen tiefsten Betriebstemperatur mindestens 27 J beträgt.



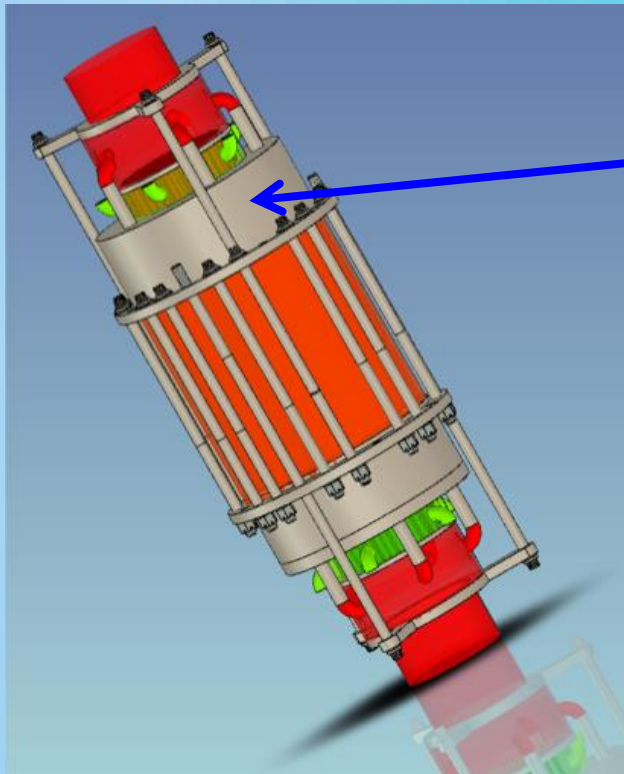
- **Druckgeräterichtlinie (Konventionell),**  
<https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=CELEX:32014L0068&from=DE>
- **KTA-Regelwerk (Kerntechnik)**
- **([http://www.kta-gs.de/common/regel\\_prog1.htm](http://www.kta-gs.de/common/regel_prog1.htm))**

## Dual Fluid Reaktor (DFR)



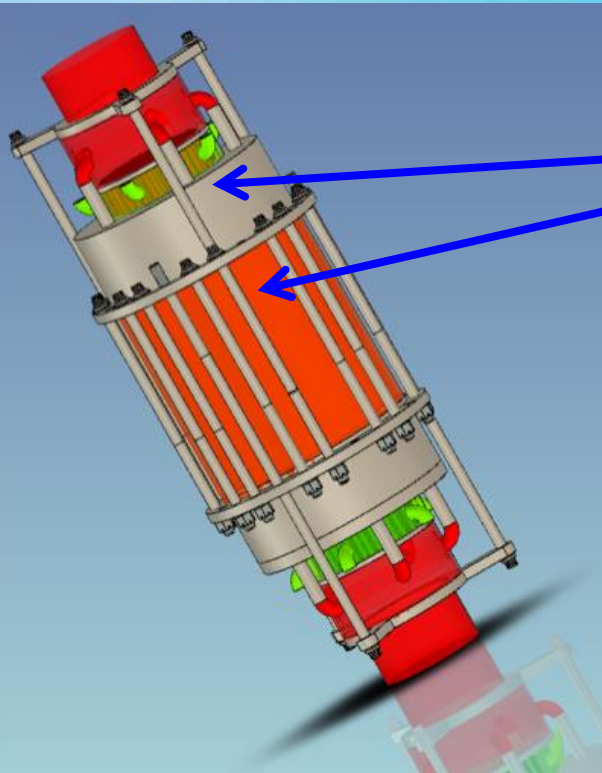
- **Keramik-Rohrleitung?**
- **Technisch nicht realisierbar!** (Keramik besitzt nicht die notwendige Verformbarkeit)
- Siehe Bruchdehnung

## Dual Fluid Reaktor (DFR)



- **Refraktärmetall-Exoskelett**
- Keine Regelwerke, keine Normen, keine Kennwerte zur Berechnung
- Keine Erfahrungen (Es gibt keine)
- Refraktärmetalle von Konstruktionseigenschaften, Schweißbarkeit und chemischer Beständigkeit sehr schwierig.
- **Jahrzehntelange Normung notwendig**
- Da sonst niemand diese Werkstoffe braucht, ist keine Hilfe zu erwarten

## Dual Fluid Reaktor (DFR)



- **Zusammenspiel Keramik-Exoskelett**
- Unterschiedliche Wärmeausdehnungskoeffizienten
- Damit im Betrieb keine Stützwirkung des Exoskeletts
- Bei Kompensation würden die Stützwirkung im Betrieb durch Fließen (Metall im Zeitstandbereich) verloren gehen
- **Fehlkonstruktion**



## DFR

## Weitere berechtigte Einwände

- Kontamination von Behältern und Rohrleitungen → Strahlenhölle
- Helium-Turbine nicht realisierbar (wurde mit THTR gezeigt)
- Aufbereitung in Anlage gefährlich und teuer
- Lagerung Spaltprodukte in der Anlage nicht zielführend
- Inhärente Sicherheit durch Aufschmelzen des Pfropfs zweifelhaft
- Regelung nur durch Brennstoffkonditionierung hat keine Chancen auf Zulassung
- Handhabung von Notfallmaßnahmen (Erdbeben, Feuer Flugzeugabsturz)?

**Rasche Realisierung ausgeschlossen (eher nie)**

## Dual Fluid Reaktor

### DFR

Der DFR hat mindestens die gleichen Probleme wie der MSR, aber aufgrund der Temperaturen um 1000 °C derzeit unlösbare Materialprobleme.

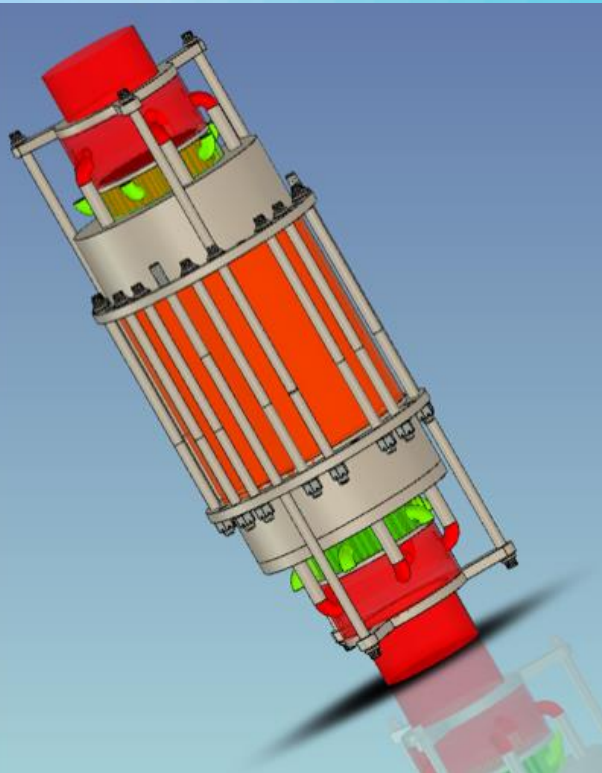
### Zielsetzungen

- Transmutation
- Brüten und
- Energiegewinnung

Sind mit den Systemem

- Natrium gekühlte Brüter
- Spallationsreaktoren sowie Leichtwassereaktoren bereits verwirklicht oder im Versuchsstadium

## Der Dual Fluid Reaktor (DFR)



- ist eine technisch aufwendige Konstruktion mit vielen Problemen deren Zielsetzungen mit anderen Konzepten einfacher erreicht werden kann
- Angaben zu Stromgestehungskosten sind in diesem Projektstadium extrem unseriös.

**Danke für  
ihre  
Aufmerk-  
samkeit**

